

# 微生物发电



**随**着将垃圾转变为有用产品技术的出现，由于能量需求不断增加，能源持续减少所带来的问题以及对污染的忧虑有所减缓。如今有些研究人员又瞄上了家庭、食品加工和其它来源的有机垃圾，将其视为能量的原料——在被称为微生物燃料电池（MFCs）装置中，利用 *Rhodospirillum rubrum* 和 *Geobacter* 细菌分解有机垃圾，将它们的化学键能量转换为电力和氢气。

**重要的能源**

根据发表在 2004 年 5 月 1 日《环境科学和技术》（*Environmental Science & Technology*）杂志上的宾夕法尼亚州立大学氢能中心主任 Bruce Logan 的文章，美国每年要处理家用废水 46 万亿立升，耗费高达 250 亿美元，所需要的电能（主要用于通风）占全国消耗总电能的 1.5%，圣路易斯的华盛顿大学化学工程系助理教授 Lars Angenent 说。据 Angenent 介绍，用微生物燃料电池处理废水，可以将处理废水所需的大部分能量节省下来。他说用这样一个微生物燃料电池装置处理一家大型食品加工厂的垃圾，可以产生足以供应 900 户家庭用电。据 Logan 说，微生物燃料电池可以减少晾干废水中活性淤泥的成本，用电量减少一半，而产生的需处理的固体物质则减少了 50~90%。

Logan 在其发表在 2004 年 5 月 1 日的文章中提到以上微生物燃料电池的潜能，他写道，2002 年美国消耗的总能量为 97 quad（ $10^{15}$  个英国热力单位的缩写），其中 13 quad 用于产生电能。假如氢气成为运输燃料的一种选择（许多人都相信能做到这点），而大部分氢气基本产自石油，那么为了用水制造氢气，还另需 12 quad 的能量。

据 Logan 介绍，全美国一年所产生的家用废水含相当 0.11 quad 能量的有机物质，家畜生产的废水含 0.3 quad 能量，食品加工废水可能含 0.1 quad 能量。这一数量虽然不算太大，但有潜在重要意义，前太阳能工业协会执行主任，现为一家能源生产营销和政策分析公司，Stella 集团总裁 Scott Sklar 说。他指出没有一种资源的量足以解决全国的能源问题。相反，能源资源应该多元化，其中许多是小资源，要使用适合当地环境和需要的多种技术来生产电力。

微生物燃料电池还可以成为世界上欠发达地区的重要能源，Logan 说。这些燃料电池使用当地产的燃料，其发电量可由当地控制。“微生物燃料电池似乎注定，至少目前如此，利用某些工业界还不能利用的能源，如海底沉淀物，或垃圾中的某些生物物质，”新墨西哥大学化学工程助理教授 Plamen Atanassov 说。微生物燃料电池的候选菌之一，*Rhodospirillum rubrum* 最早是从佛吉尼亚的牡蛎海湾沉淀物中分离得到的，而 *Geobacter metallireducens* 则最早是从波拖马河（Potomac River）沉淀物分离而得。

**带来希望的突破**

微生物燃料电池可以追溯到 20 世纪 90 年代，Angenent 说。在 1996 年的美国化学学会题为“有害废物处理新技术”会议上，韩国科学家 Byung Hong Kim 和 Doo-Hong Park 首次提出了利用“无介导物的生物燃料电池”处理废水。最近 5 年的一系列突破为该技术带来了新希望。

Claudia V. Johnson/University of Massachusetts Amherst, Chris Reuter/EHP



撇取水面的浮物: Bruce Logan与宾夕法尼亚州立大学的同事们通过研究证明MFCs可以直接用废水发电,可能降低电力成本和减少固体垃圾。

突破之一是,2002年1月18日《科学》(Science)杂志报道了Massachusetts Amherst大学微生物学系Derek Lovley教授发现的发电的Geobacter菌。在这之前,1998年7月(14期)《细菌学》(Bacteriology)杂志上发表了德国和澳大利亚研究人员的发现,有些还原铁的细菌中的细胞色素(一种转移电子到其它蛋白的专性酶),能跨越细胞外膜,直接将电子转移到外部金属上,形成电路。这是微生物燃料电池中电流的根本来源。

这些发现为建造微生物燃料电池中的细菌和电极以改进电子转移提供了前提。

在2005年6月23日的《自然》(Nature)杂志上,Lovley宣称发现了“纳米电线”,从字面上看是Geobacter制造的细微电线,可能被细菌用来传递电子。该发现为电子传递进一步开创了可能性。他还在2003年10月刊《自然生物科技》(Nature Biotechnology)上发表了一项研究,表明Rhodofex菌氧化葡萄糖时以80%的电子效率提供恒定的电流(这是一种从碳水化合物中获取电能的好方法)。

另外还有一项突破是Park和密歇根大学分子生物学家J. Greg Zeikus发表在2002年6月《应用微生物学和生物技术》(Applied Microbiology and Biotechnology)杂志上的发明,通过在微生物燃料电池中使用混合微生物群落而不是纯培养的微生物,可以使微生物燃料电池的发电量提高大约6倍。这是利用废水产生能量的一大优势,因为废水中有着多种多样的微生物,Angenent说。Angenent打算在今后的研究中深入了解其确切的机制。

技术的进步对其工程设计也有所帮助。一年前,在一项未发表的研究中,Angenent将甲烷消化池中使用的“向上流”系统与微生物燃料电池技术结合起来以解决需要机械抽吸和搅拌的问题。在向上流系统中,依靠重力为动力,用管道将燃料电池上方的废水输到下方、周围,然后向上进入阳极的底部——与虹吸管的方向相反。这样就没有必要抽吸和混匀了。

第一个微生物燃料电池的发电量为每平方米

阳极表面积1~40毫瓦( $\text{mW}/\text{m}^2$ ),Logan说。他说,就在去年他的实验室利用家用的废水发电已经能达到 $500 \text{ mW}/\text{m}^2$ ,用葡萄糖和空气达到 $1500 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。他还说最近比利时的研究人员用葡萄糖达到了 $3600 \text{ mW}/\text{m}^2$ ,但在他们的生产过程中需要用到一种不可再生的化学物,而不是空气。

## 电力与氢气

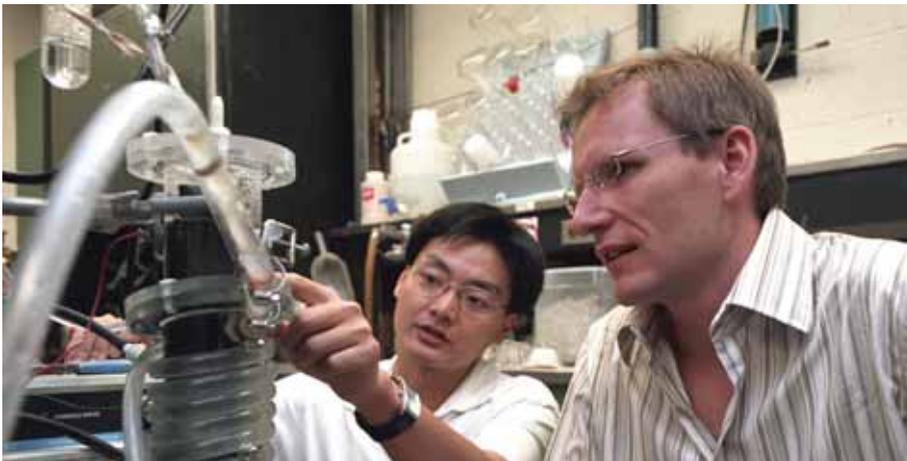
微生物燃料电池可以发电,经过改造也可以生产氢气。这两种系统的电力来源都是有机化合物中蕴藏的化学能。细菌生活在阳极的生物膜上,分解有机物,将电子与质子分开。这些电子和质子然后运动到阴极,前者是通过外部的电线,而后者以扩散的方式通过电解液,电解液是种不导电的物质。

在发电的微生物燃料电池中,质子和电子在阴极与氧结合形成水。这个过程消耗电子,使得更多的电子不断的从阳极流向阴极。

在改造成生产氢气的微生物燃料电池中,阴极维持在无氧状态。但为了制造氢气,必须打破热动力屏障。为克服这一屏障,Logan用电源给电路增加电压。

生产氢气的微生物燃料电池的效率大约是发电电池的两倍,Logan说,这是因为在发电电池中有部分氧气漏回到阳极。然而,给生产氢气的系统加压需要大约相当于所生产氢气能量的六分之一。如果氢气转化为其它形式的能量还要损失得更多。如果以电效率为终产品,无论发电还是生产氢气都不具明显优势。

生产氢气微生物燃料电池的主要好处是它们为不同能量需求提供了更多的选择,Logan说。例

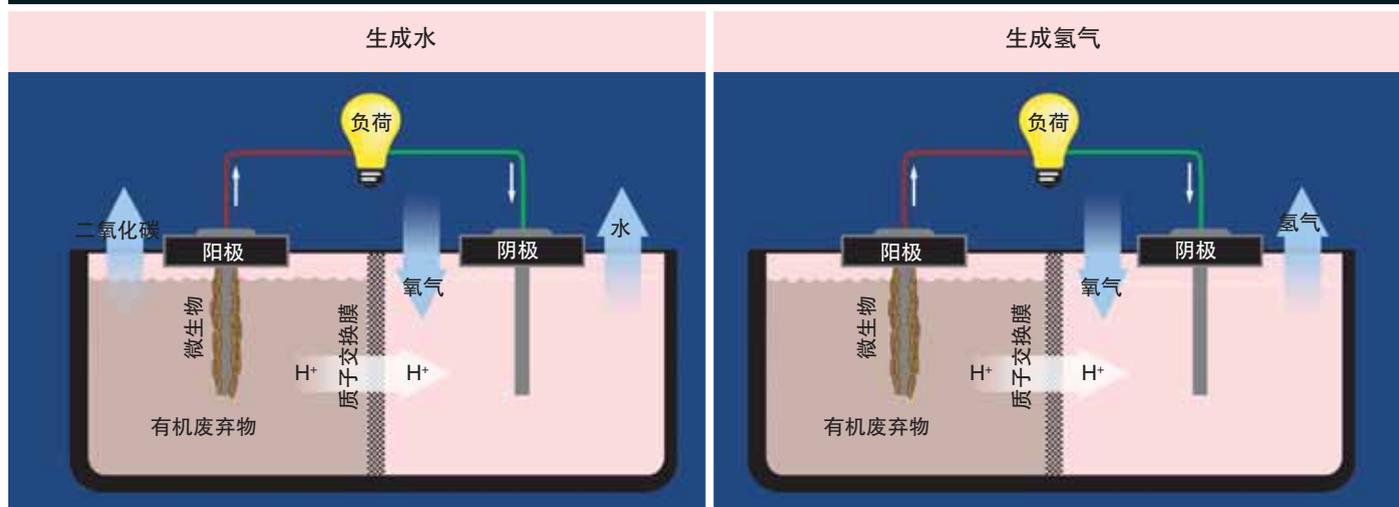


小小微生物的宏伟计划: Jason He(左)和Lars Angenent检查他们的微生物燃料电池。在Derek Lovley的实验室内,一架以海生Geobacter菌为动力的SUV模型。



Clockwise from top: Greg Grieco/The Pennsylvania State University; Derek Lovley; David Kipler/Washington University in St. Louis

微生物燃料电池原理示意图



如，可以将氢气储藏起来供电力不足时发电或用作运输燃料。“不过，如果只是想就地使用电力，最好还是不要生产氢气而直接发电。”他说。

**更多的技术挑战**

严格地说，微生物燃料电池仍处于实验阶段。“它尚未形成自己的设计原理，只是借用相邻技术的设计，”Atanassov说，“它还远未成熟到要解决设计的问题。”

发电微生物燃料电池的阴极上的氧气是对微生物燃料电池的一个巨大挑战。“质子交换膜”将阴极和阳极分隔开来，可以容许质子通过，但阻止较大的氧气分子扩散到阳极。然而，有些氧气分子会设法通过质子交换膜进入阳极，质子在阳极得到本来应该流入电路的电子，使电力减少，Lovley说。

微生物燃料电池的功率密度低也是个重要问题。微生物燃料电池的测功率密度单位为W/m<sup>2</sup>，而传统燃料电池的测功率密度单位为W/cm<sup>2</sup>，就清楚地说明了这两者的差异，Atanassov说。微生物燃料电池功率密度如此之低，意味着电极必须极其巨大，而电极的成本并不低。

功率密度是微生物与电极间界面的函数，资助微生物燃料电池研究的海军研究办公室项目经理 Harold Bright 说。“我们得到的电子从细菌向电极迁移的速度非常慢。”

为达到商业要求，加大微生物燃料电池体积是另一挑战。目前实验室的样品所使用的材料，如碳纸和碳衣制的电极用于商业系统不够牢固。此外，实验用的微生物燃料电池比一个啤酒杯还

小，若要商业化就得造得象大楼那样大（用增大部件补偿低功率密度），这样无疑大大增加了阳极与阴极间的距离。而这又反过来使氢气从阳极向阴极扩散变慢，降低了效率。

为使微生物燃料电池能与其前辈—甲烷消化池技术竞争，功率密度必须达到目前所能达到的最大密度的两倍以上，即8500 mW/m<sup>2</sup>，Angenent说。他说，因此“需要有新的突破。”

使电子迁移速率提高的微生物学和电极技术的进步可以增加电力密度，通过细菌基因工程可以使电子迁移更快。Lovley系统地剔除外膜细胞色素基因，以确定哪个细胞色素对电力生产是重要的。“我们现在能确认是否基因工程改良的*Geobacter*菌能产生更多细胞色素，通过改良电极提高细胞色素相互作用水平，进而相应提高发电量。”

发电能力的提高有着巨大的空间。“如果*Geobacter*菌将电子迁移到电极的速度能达到其迁

移到天然电子受体三价铁那么高的速度，电子流动速率，即电流，可能要提高一万倍。”Lovley说。

使用垃圾作为无本的原料能进一步改善经济，Logan说。垃圾是理想原料，因为它们的处理“已经成为一大经济负担”。

目前，除了在使用如遥控传感器这些设备上，得到了海军、能源部和国防先进研究项目局的资助外，微生物燃料电池实际上尚未得到政府的资助。“目前我们制造的实验室用的微生物燃料电池系统相对于我们得到回报的发电量来说，花费的钱太多了，”Logan承认。“但是五十年前的太阳能研究也曾有过类似经历。”如今太阳能已成为国家能源供应的重要部分（尽管占比例还不小），Logan预测微生物燃料电池的发展也将遵循同样的规律。

—David C. Holzman

译自 EHP 113:A754-A757 (2005)

**参 考 读 物**

Holmes DE, Nicoll JS, Bond DR, Lovley DR. 2004. Potential role of a novel psychrotolerant member of the family *Geobacteraceae*, *Geopsychrobacter electrodiphilus* gen. nov., sp. nov., in electricity production by a marine sediment fuel cell. *Appl Environ Microbiol* 70:6023-6030.

Liu H, Grot S, Logan BE. 2005. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ Sci Technol* 39:4317-4320.

Logan BE. 2004. Extracting hydrogen and electricity from renewable resources [review]. *Environ Sci Technol* 38:160A-167A.

Reguera G, McCarthy KD, Mehta T, Nicoll JS, Tuominen MT, Lovley DR. 2005. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature* 435:1098-1101.